



#4

Patent  
Attorney's Docket No. 033275-317

**IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE**

In re Patent Application of )  
Alexander BEECK et al. ) Group Art Unit:  
Application No.: 10/002,189 ) Examiner: Unassigned  
Filed: December 5, 2001 )  
For: TOOL AND PROCESS FOR CASTING )  
A SHAPED PART FOR THE )  
PRODUCTION OF A TURBINE BLADE )

**CLAIM FOR CONVENTION PRIORITY**

Assistant Commissioner for Patents  
Washington, D.C. 20231

Sir:

The benefit of the filing date of the following prior foreign application in the following foreign country is hereby requested, and the right of priority provided in 35 U.S.C. § 119 is hereby claimed:

German Patent Application No. 100 64 268.3

Filed: December 22, 2000.

In support of this claim, enclosed is a certified copy of said prior foreign application. Said prior foreign application referred to in the oath or declaration. Acknowledgment of receipt of the certified copy is requested.

Respectfully submitted,

BURNS, DOANE, SWECKER & MATHIS, L.L.P.

Date: March 8, 2002

By: Elaine P. Spector  
Elaine P. Spector  
Registration No. 40,116

P.O. Box 1404  
Alexandria, Virginia 22313-1404  
(703) 836-6620

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 100 64 268.3  
**Anmeldetag:** 22. Dezember 2000  
**Anmelder/Inhaber:** ALSTOM Power N.V., Amsterdam/NL  
**Bezeichnung:** Werkzeug und Verfahren zum Gießen eines  
Formteils für die Herstellung einer Turbinenschaufel  
**IPC:** B 22 C, B 22 D

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 29. November 2001  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
**Der Präsident**  
Im Auftrag

Dzierzon

Werkzeug und Verfahren zum Gießen eines Formteils für  
die Herstellung einer Turbinenschaufel

Technisches Anwendungsgebiet

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Werkzeug  
5 zum Gießen eines Formteils für die Herstellung einer  
Turbinenschaufel, bei dem mehrere Werkzeugblöcke in  
einer vorgegebenen Weise formschlüssig zusammengesetzt  
einen Hohlraum für das Formteil bilden, in den über  
einen oder mehrere Zugangsöffnungen fließfähiges  
10 Material, insbesondere Wachs, einbringbar ist. Die  
Erfindung befasst sich weiterhin mit einem Verfahren  
zur Herstellung eines Formteils für eine Turbinen-  
schaufel mit einem derartigen Werkzeug.

15 Bei der Entwicklung von Turbinenschaufeln sind in  
den verschiedenen Entwicklungsstufen, wie der Guss-,  
der Bearbeitungs- oder der Fertigungsentwicklung,  
zahlreiche Tests und Anpassungen vorzunehmen, die sich  
auch auf die ursprüngliche Werkzeugentwicklung  
20 auswirken können. Gerade Unterschiede zwischen den  
aerodynamischen Modellberechnungen und den späteren  
realen Eigenschaften des gefertigten Systems können es  
erforderlich machen, einen neuen Satz Werkzeuge zur  
Erstellung der Ausgangs-Formteile anfertigen zu müssen.

25

Beim Herstellungs- und Entwicklungsprozess einer  
Turbinenschaufel wird zunächst die den Anforderungen  
gerechte Form der Turbinenschaufel als dreidimensio-  
nales Modell berechnet. Aus diesem Modell werden  
30 Spritzgusswerkzeuge hergestellt, die das Gießen eines

Formteils mit der berechneten dreidimensionalen Form ermöglichen. Diese Spritzgusswerkzeuge setzen sich in der Regel aus mehreren Werkzeugblöcken zusammen, die in einer vorgegebenen Weise formschlüssig zusammengesetzt  
5 einen Hohlraum für das Formteil bilden. In den gebildeten Hohlraum wird über einen oder mehrere Zugangsöffnungen geschmolzenes Wachs unter hohem Druck eingespritzt. Das eingespritzte Wachs erhärtet nach seiner Abkühlung zu einem Formteil in der durch die  
10 Spritzgusswerkzeuge vorgegebenen Form. Anschließend werden die Werkzeugblöcke entfernt. Mit dem auf diese Weise bereitgestellten Formteil wird in bekannter Weise eine keramische Gussform für den späteren Präzisionsguss der Turbinenschaufel erzeugt.

15 Die Herstellung der Werkzeugblöcke für die Spritzgussform ist sehr aufwendig, da diese in der Regel aus Stahl hergestellt werden und die Form der späteren Turbinenschaufel bereits möglichst präzise festlegen sollen. Weiterhin muss der Formschluss  
20 zwischen den einzelnen Werkzeugblöcken eine ausreichende Dichtwirkung gegenüber dem unter hohen Druck eingespritzten Wachs erzielen.

Gerade die Dimensionierung und Herstellung der  
25 ersten Reihe von Eintrittsleitschaufeln der Turbine stellt sehr hohe Anforderungen, da durch diese erste Reihe der Strömungsverlauf des Heißgases sehr empfindlich beeinflusst wird. Eine minimale Abweichung des Anstellwinkels dieser Leitschaufeln von einem Idealwert  
30 führt bereits zu einer deutlichen Druckerhöhung oder Druckerniedrigung in der Gasturbine, die sich erheblich auf den Wirkungsgrad auswirken kann. Im Falle einer derartigen unerwünschten Abweichung muss daher ein

- 3 -

neues Formteil mit entsprechend geändertem Anstellwinkel erzeugt werden, wofür die Erstellung eines vollkommen neuen Spritzgusswerkzeuges erforderlich ist. Weiterhin sind während des gesamten Herstellungsprozesses mehrere zusätzliche Toleranzen zu berücksichtigen, die ebenfalls wesentlichen Einfluss auf den Strömungsverlauf des Heißgases nehmen können. Beispielhaft seien hierbei Streuungen bei der Gussbearbeitung oder Abweichungen in Beschichtungs-dicken genannt. Derartige Abweichungen sind bei der anfänglichen Dimensionierung des Formteiles noch nicht bekannt und können daher im nachhinein ebenfalls eine Änderung der Geometrie der Spritzgusswerkzeuge nach sich ziehen.

15

Ausgehend von diesem Stand der Technik liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein Werkzeug sowie ein Verfahren zur Herstellung eines Formteils für eine Turbinenschaufel anzugeben, mit denen eine leichte Änderung der Anströmgeometrie bzw. des Anstellwinkels der Turbinenschaufel ohne völlige Neuherstellung des Spritzgusswerkzeuges bewältigt werden kann.

20

#### Darstellung der Erfindung

25

Die Aufgabe wird mit dem Werkzeug bzw. dem Verfahren der Patentansprüche 1 bzw. 9 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen des Werkzeuges und des Verfahrens sind Gegenstand der Unteransprüche.

30

Das erfindungsgemäße Werkzeug zum Gießen eines Formteils für die Herstellung einer Turbinenschaufel setzt sich aus mehreren Werkzeugblöcken zusammen. Diese Werkzeugblöcke bilden, wenn sie in einer vorgegebenen

Weise formschlüssig zusammengesetzt bzw. zusammen-  
geschoben werden, einen Hohlraum für das Formteil, in  
den über einen oder mehrere dafür vorgesehene  
Zugangsöffnungen fließfähiges Material, wie beispiels-  
5 weise geschmolzenes Wachs, einbringbar ist. Das  
vorliegende Werkzeug zeichnet sich dadurch aus, dass  
zumindest einer der Werkzeugblöcke einen dreh- oder  
verschiebbaren Einschub oder Einsatz aufnimmt, der mit  
einer Fläche an den Hohlraum angrenzt und in unter-  
10 schiedlichen Positionen und/oder Orientierungen  
gegenüber dem Werkzeugblock fixierbar ist, so dass in  
den unterschiedlichen Positionen und/oder Orien-  
tierungen des Einschubs oder Einsatzes unterschiedliche  
Hohlraumgeometrien bzw. Hohlraumvolumina gebildet  
15 werden.

Der Einschub bzw. Einsatz besteht hierbei vorzugs-  
weise aus dem gleichen Material wie die Werkzeugblöcke  
und ist in diese formschlüssig einfügbar. Durch die  
Möglichkeit, in den unterschiedlichen Positionen  
20 und/oder Orientierungen des Einschubs oder Einsatzes  
unterschiedliche Hohlraumgeometrien zu erzeugen, kann  
eine nachträgliche Anpassung der Geometrie des Form-  
teils durch erneutes Einbringen bzw. Einspritzen des  
flüssigen Materials in den Hohlraum bei entsprechend  
25 veränderter Position und/oder Orientierung des  
Einschubs vorgenommen werden. Eine Neuherstellung des  
gesamten Spritzgusswerkzeuges, d. h. der formenden  
Innenflächen der jeweiligen Werkzeugblöcke ist dadurch  
nicht mehr erforderlich. Selbstverständlich können ein  
30 oder mehrere Einschübe bzw. Einsätze in ein oder  
mehreren Werkzeugblöcken vorgesehen sein, die der  
Fachmann entsprechend der beabsichtigten Einstell- bzw.  
Verstellmöglichkeit anordnen kann. Die Einschübe werden

dann vor dem Einfüllen des fließfähigen Materials in der gewünschten Position mit einem geeigneten Fixiermittel fixiert, so dass sie ihre Position und/oder Orientierung während des Einfüll- und

5 Aushärtvorgangs des fließfähigen Materials nicht mehr ändern. Die Fixierung der ein oder mehreren Einschübe erfolgt vorzugsweise über Befestigungsstifte, die in entsprechend vorgesehene Ausnehmungen an den jeweiligen Werkzeugblöcken eingreifen. Die Befestigungsstifte

10 werden durch entsprechende Öffnungen im Einschub eingeschoben. Die korrespondierenden Ausnehmungen an den Werkzeugblöcken sind je nach gewünschter Stufung der Verstellmöglichkeiten als entsprechend feines Lochmuster ausgebildet.

15

Vorzugsweise sind der oder die Einschübe so ausgestaltet, dass sie die Flächen des zu erstellenden Formteiles festlegen, die den Verlauf des Heißgaspfades der Turbinenschaufel bestimmen oder mitbestimmen. Eine

20 besonders vorteilhafte Ausführungsform betrifft hierbei die Anordnung von zwei Einschüben oder Einsätzen in gegenüberliegenden Werkzeugblöcken. Die Einschübe bzw. Einsätze sind hierbei derart ausgebildet, dass sie zusammengesetzt eine zylinderförmige Einschubeinheit

25 zur Festlegung der Geometrie des Schaufelblattes bilden. Die aus den beiden Einschüben bzw. Einsätzen zusammengesetzte Einschubeinheit ist in den Werkzeugblöcken um ihre Längsachse drehbar und lässt sich in verschiedenen Drehpositionen fixieren. Durch unter-

30 schiedliche Drehpositionen dieser Einschubeinheit lassen sich unterschiedliche Anstellwinkel des Schaufelblattes realisieren.

Vorzugsweise sind Fixiermöglichkeiten in derartigen Abständen vorgesehen, dass der Anstellwinkel in Winkelschritten von  $0,25 - 0,5^\circ$  verändert werden kann. Auf diese Weise lässt sich sehr schnell, einfach und ohne die Neukonstruktion der Werkzeugblöcke ein Formteil mit geändertem Anstellwinkel erzeugen, falls sich bei der Weiterentwicklung herausstellt, dass der ursprünglich konzeptionierte Anstellwinkel aufgrund von Fertigungstoleranzen die Anforderungen an den Heißgaspfad nicht erfüllt.

Eine derartige Ausführungsform des Werkzeuges hat den weiteren Vorteil, dass damit auch Formteile für Turbinenschaufeln unterschiedlicher Anlagen hergestellt werden können, ohne jeweils ein separates Werkzeug bereitstellen zu müssen. Hierdurch können beispielsweise mit ein und demselben Werkzeug Turbinenschaufeln für Turbinenanlagen mit anderen Strömungsverhältnissen oder anderen Massenflüssen hergestellt werden, wie sie insbesondere bei mit unterschiedlichen Brennstofftypen betriebenen Gasturbinen auftreten.

Für eine Anpassung der Trennlinien im Werkzeug bei Änderung der Position und/oder Orientierung des Einschubs können Zwischenstücke vorhanden sein, die die Trennlinien verschieben und/oder ein eventuelles Spiel zwischen dem Einschub und dem Werkzeugblock oder zwischen den einzelnen Einschüben ausgleichen. Hierbei ist es auch denkbar, bereits entsprechende vorzugsweise keilförmige Zwischenräume zwischen den Einschüben vorzusehen, in die die entsprechenden Zwischenstücke nach der Positionierung der Einschübe einschiebbar sind.



- 7 -

In einer weiteren Ausgestaltungsmöglichkeit des vorliegenden Werkzeuges ist in einem Werkzeugblock, der im Wesentlichen der Formgebung der Schaufelplattform und des Schaufelfußes dient, ein entlang einer Achse  
5 verschiebbarer Einschub vorgesehen, durch dessen Verschiebeposition die Höhe der Schaufelplattform festgelegt wird. Die Verschiebeachse entspricht hierbei der z-Richtung, die beim Einsatz der späteren Turbinenschaufel mit der radialen Richtung übereinstimmt.

10

Bei der Herstellung des Formteils werden die einzelnen Werkzeugblöcke zusammengesetzt, vorzugsweise zusammengeschoben, der oder die Einschübe bzw. Einsätze in eine Position und/oder Orientierung gebracht, mit  
15 der die gewünschte Geometrie des Hohlraums bzw. des späteren Formteils erzeugt wird, und in dieser Position an den Werkzeugblöcken fixiert. Anschließend wird geschmolzenes Wachs unter hohem Druck in den so erzeugten Hohlraum eingespritzt und dort durch Erkalten  
20 verfestigt. Nach der Verfestigung werden die Werkzeugblöcke mit den zugehörigen Einschüben bzw. Einsätzen von dem erhärteten Wachs-Formteil getrennt. Durch die bereits beschriebenen Zwischenstücke wird eine Trennung der Einschübe von dem Formteil erleichtert.

25

Das Werkzeug sowie das zugehörige Verfahren zum Spritzgießen eines Formteils für die Herstellung einer Turbinenschaufel eignet sich insbesondere für die Einstellung des Anstellwinkels des Schaufelblattes der  
30 Turbinenschaufel oder für die Einstellung der Höhe der Schaufelplattform der Turbinenschaufel. Besondere Vorteile bietet das Werkzeug in Fällen, in denen eine höhere Zahl von Anpassung während der Entwicklung der

Turbinenschaufel vorgenommen werden müssen. Je mehr Anpassungen erforderlich sind, desto mehr Vorteile bietet das vorliegende Verfahren, da nicht für jede Anpassung ein neues Spritzgusswerkzeug hergestellt werden muss. Die Anpassungen lassen sich vielmehr durch einfache Verstellung des Einschubs innerhalb des Werkzeuges realisieren.

Das Werkzeug bzw. das zugehörige Verfahren beziehen sich zwar in erster Linie auf die Herstellung von Formteilen aus Wachs. Dem Fachmann ist jedoch offensichtlich, dass außer Wachs auch andere schmelzbare Materialien für die Herstellung des Formteils mit dem vorliegenden Werkzeug eingesetzt werden können. Weiterhin spielen die Materialien der Werkzeugblöcke keine für die Erfindung wesentliche Rolle, so dass dem Fachmann hierfür die entsprechend der jeweiligen Anwendung erforderlichen Materialien zur Verfügung stehen. Die äußere Ausgestaltung der einzelnen Werkzeugblöcke kann hierbei ebenfalls gemäß dem bekannten Stand der Technik vorgenommen werden.

#### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

Die Erfindung wird nachfolgend anhand eines Ausführungsbeispiels in Verbindung mit den Zeichnungen ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens nochmals kurz erläutert. Hierbei zeigen:

Fig. 1 ein Beispiel für ein Spritzgießwerkzeug, das sich aus mehreren Werkzeugblöcken zusammensetzt;

Fig. 2 schematisch den Aufbau einer Turbinenschaufel; und

Fig. 3 ein Beispiel für die Ausgestaltung eines Einsatzes in einem Werkzeug gemäß der vorliegenden Erfindung.

5 Wege zur Ausführung der Erfindung

Figur 1 zeigt ein Beispiel für ein Spritzgießwerkzeug zur Herstellung von Formteilen für Turbinenschaufeln. Das Werkzeug besteht aus einer Grundplatte 15, auf der 4 Werkzeugblöcke 1 - 4 angeordnet sind. Grundplatte sowie Werkzeugblöcke bestehen aus einem Stahlmaterial. Die Werkzeugblöcke können in entsprechenden Führungen der Grundplatte 15 verschoben werden, wie dies aus der Figur ersichtlich ist. Die Innenflächen dieser Werkzeugblöcke 1 - 4 sind derart ausgeformt, dass sie nach dem Zusammensetzen einen Hohlraum bilden, der die Form für das zu fertigende Formteil vorgibt.

Die einzelnen Werkzeugblöcke werden in diesem Beispiel in den jeweiligen Führungen zusammengeschoben, so dass sie den Hohlraum formschlüssig nach außen abdichten. In der Grundplatte 15 ist in diesem Beispiel eine Wachseinspritzöffnung 6 vorgesehen, über die das eingespritzte flüssige Wachs über entsprechende gestrichelt angedeutete Kanäle in den Hohlraum 5 gelangt. Das Wachs wird hierbei unter hohem Druck eingespritzt und durch Erkalten in dem Hohlraum verfestigt. Anschließend werden die Werkzeugblöcke 1 - 4 von dem auf diese Weise entstandenen Wachsformteil getrennt. Diese Trennung geschieht über das Auseinanderziehen der einzelnen Werkzeugblöcke in den Führungen. Zu diesem Zweck sind im vorliegenden Beispiel entsprechende Griffe 16 an den Werkzeugblöcken vorgesehen. Eine derartige Anordnung ist bereits aus

- 10 -

dem Stand der Technik bekannt, kann jedoch auch für das Werkzeug der vorliegenden Erfindung eingesetzt werden, wobei dann zumindest eine Begrenzungsfläche des durch die Werkzeugblöcke 1 - 4 gebildeten Hohlraums 5 durch eine Fläche eines in dieser Darstellung nicht sichtbaren Einschubs bzw. Einsatzes gebildet wird.

Mit einem derartigen Werkzeug werden Formteile für Turbinenschaufeln gefertigt, wie sie beispielsweise aus Figur 2 ersichtlich sind. Diese Figur 2 zeigt die typischen Bestandteile einer Turbinenschaufel 10, das Schaufelblatt 11, ein Schaufelband 13 sowie eine Plattform 12. Für die Herstellung eines derart aufgebauten Formteils sind die Innenflächen der Werkzeugblöcke 1 und 2 der Figur 1 zur Festlegung der Saug- und Druckseite des Schaufelblattes 11, der Werkzeugblock 3 zur Festlegung der Form der Schaufelplattform 12 sowie der Werkzeugblock 4 zur Festlegung der Form des Schaufelbandes 13 ausgestaltet.

Bei fest vorliegender Geometrie der Innenflächen dieser Werkzeugblöcke 1 - 4 besteht keinerlei Möglichkeit einer nachträglichen Anpassung der Geometrie beispielsweise zur Erzeugung eines anderen Anstellwinkels des Schaufelblattes. Eine derartige Einstellmöglichkeit wird mit dem erfindungsgemäßen Werkzeug realisiert, das in einer möglichen Ausgestaltungsvariante in Figur 3 dargestellt ist. Figur 3 zeigt hierbei lediglich einen Teil des Werkzeuges mit den Werkzeugblöcken 1 und 2 zur Festlegung des Schaufelblattes 11. Die weiteren Werkzeugblöcke 3 und 4 entsprechend der Figur 1 sind ausgestaltet, wie dies aus dem Stand der Technik bekannt ist.

- 11 -

Im Unterschied zu den bekannten Werkzeugen des Standes der Technik für die Herstellung von Formteilen für Turbinenschaufeln weist das vorliegende Werkzeug in diesem Beispiel zwei Werkzeugblöcke 1 und 2 auf, die  
5 jeweils einen Einschub 7 bzw. 8 formschlüssig aufnehmen. Zu diesem Zweck sind die Innenflächen der beiden Werkzeugblöcke 1 und 2 entsprechend ausgeformt. Beim Zusammensetzen der beiden Werkzeugblöcke mit ihren  
10 Einschüben bzw. Einsätzen 7 und 8 wird eine zylinderförmige Einschubeinheit 9 gebildet, die innerhalb der Werkzeugblöcke 1, 2 um ihre Längsachse drehbar ist, wie dies in der Figur 3 mit dem Pfeil angedeutet ist. Die  
beiden Einschübe 7 und 8 bilden hierbei in Zusammen-  
15 wirkung die geometrische Form für das Schaufelblatt 11, d. h. ihre den Hohlraum 5 begrenzenden Flächen sind entsprechend der Druck- und Saugseite des Schaufel-  
blattes ausgeformt.

Durch die Drehbarkeit der Einschubeinheit 9 lassen  
20 sich beliebige Anstellwinkel des Schaufelblattes 11 gegenüber der Plattform 12 bzw. dem Schaufelband 13 erzeugen. Die Einschubeinheit 9 wird über in der Figur nicht dargestellte Befestigungsstifte gegenüber den  
Werkzeugblöcken 1 und 2 in der entsprechend gewünschten  
25 Position fixiert. Die Werkzeugblöcke 1 und 2 weisen zu diesem Zweck ein entsprechendes Lochraster für  
verschiedene Einstellungen auf.

Bei diesem Ausführungsbeispiel wird weiterhin ein  
30 im Wesentlichen keilförmiger Hohlraum zwischen den beiden Einschüben 7, 8 am Übergang zu den Werkzeug-  
blöcken 1, 2 vorgesehen, in dem austauschbare Zwischen-  
stücke 16 eingesetzt werden. Diese Zwischenstücke 14

- 12 -

erleichtern die Demontage der einzelnen Werkzeugblöcke nach der Erhärtung des eingespritzten Materials.

Das Werkzeug wird in einer bevorzugten Ausführungsform so ausgestaltet, dass sich der Anstellwinkel, d. h. die Einschubeinheit 9, in Schritten von etwa  $0,25 - 0,5^\circ$  um einen Maximalwinkel von etwa  $2 - 3^\circ$  drehen und fixieren lässt. Dies reicht für die Entwicklung einer Turbinenschaufel unter Berücksichtigung möglicher späterer Anpassungsänderungen aus.

In gleicher Weise kann ein entsprechender Einschub, diesmal in Richtung der Blöcke 1 und 2 verschiebbar ausgestaltet, im Werkzeugblock 3 vorgesehen sein, um die Höhe der Plattform 12 des Formteils einstellen zu können. Selbstverständlich sind auch andere Flächen des Formteils auf diese Weise veränder- bzw. einstellbar, wenn ein entsprechend beweglicher Einschub vorgesehen wird.

20

Bezugszeichenliste

- |    |    |                                         |
|----|----|-----------------------------------------|
|    | 1  | Werkzeugblock für die Druckseite        |
|    | 2  | Werkzeugblock für die Saugseite         |
| 5  | 3  | Werkzeugblock für die Schaufelplattform |
|    | 4  | Werkzeugblock für das Schaufelband      |
|    | 5  | Hohlraum                                |
|    | 6  | Zugangsöffnungen                        |
|    | 7  | Einschub oder Einsatz                   |
| 10 | 8  | Einschub oder Einsatz                   |
|    | 9  | zusammengesetzte Einschubeinheit        |
|    | 10 | Turbinenschaufel                        |
|    | 11 | Schaufelblatt                           |
|    | 12 | Schaufelplattform                       |
| 15 | 13 | Schaufelband                            |
|    | 14 | Zwischenstücke                          |
|    | 15 | Grundplatte                             |
|    | 16 | Handgriff                               |

Patentansprüche

1. Werkzeug zum Gießen eines Formteils für die  
Herstellung einer Turbinenschaufel,  
mit mehreren Werkzeugblöcken (1, 2, 3, 4), die in  
5 einer vorgegebenen Weise formschlüssig zusammen-  
gesetzt einen Hohlraum (5) für das Formteil  
bilden, in den über einen oder mehrere Zugangs-  
öffnungen (6) fließfähiges Material einbringbar  
ist,  
10 dadurch gekennzeichnet,  
dass zumindest einer der Werkzeugblöcke (1, 2)  
einen dreh- oder verschiebbaren Einschub oder  
Einsatz (7, 8) aufnimmt, der mit einer Fläche an  
den Hohlraum (5) angrenzt und in unterschiedlichen  
15 Positionen und/oder Orientierungen gegenüber dem  
zumindest einen Werkzeugblock (1, 2) fixierbar  
ist, so dass in den unterschiedlichen Positionen  
und/oder Orientierungen des Einschubs oder  
Einsatzes (7, 8) unterschiedliche Hohlraum-  
20 geometrien gebildet werden.
2. Werkzeug nach Anspruch 1  
dadurch gekennzeichnet,  
dass der Einschub oder Einsatz (7, 8) die  
25 Heißgasgeometrie des Schaufelblattes (11) der  
Turbinenschaufel (10) bestimmt oder mit bestimmt.
3. Werkzeug nach Anspruch 1 oder 2,  
dadurch gekennzeichnet,  
30 dass zumindest zwei Einschübe oder Einsätze (7, 8)



- 15 -

- in gegenüberliegenden Werkzeugblöcken (1, 2) derart ausgebildet sind, dass sie zusammengesetzt eine zylinderförmige Einschubeinheit (9) zur Festlegung der Geometrie des Schaufelblattes (11) bilden, die zur Einstellung des Anstellwinkels des Schaufelblattes (11) um ihre Längsachse in den Werkzeugblöcken (1, 2) drehbar und in verschiedenen Drehpositionen fixierbar ist.
- 10 4. Werkzeug nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass der drehbare Einschub oder Einsatz (7, 8) in Drehpositionen fixierbar ist, die sich jeweils um 0,25 bis 0,5° unterscheiden.
- 15 5. Werkzeug nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der oder ein weiterer Einschub oder Einsatz in einem Werkzeugblock (3), der die Geometrie der Schaufelplattform (12) festlegt, derart entlang einer Achse verschiebbar angeordnet ist, dass in unterschiedlichen Verschiebepositionen unterschiedliche Höhen der Schaufelplattform (12) erzeugt werden.
- 20 6. Werkzeug nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass Zwischenstücke (14) vorgesehen sind, die in zwischen dem Einschub oder Einsatz (7, 8) und den Werkzeugblöcken (1, 2) und/oder zwischen mehreren Einschüben oder Einsätzen (7, 8) auftretende Zwischenräume einschiebbar sind.
- 25 30

7. Werkzeug nach einem der Ansprüche 1 bis 6,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass der zumindest eine Einschub oder Einsatz (7,  
5 8) in den unterschiedlichen Positionen und/oder  
Orientierungen über Befestigungsstifte gegenüber  
dem Werkzeugblock (1, 2) fixierbar ist, die in  
entsprechende Ausnehmungen im Werkzeugblock (1, 2)  
eingreifen.
- 10 8. Werkzeug nach einem der Ansprüche 1 bis 7,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass die Werkzeugblöcke (1, 2, 3, 4) einen  
Werkzeugblock (1) für die Druckseite des  
15 Schaufelblattes (11), einen Werkzeugblock (2) für  
die Saugseite des Schaufelblattes (11), einen  
Werkzeugblock (3) für die Schaufelplattform (12)  
sowie einen Werkzeugblock (4) für das Schaufelband  
(13) der Turbinenschaufel (10) umfassen, die auf  
20 einer Grundplatte (15) angeordnet sind.
9. Verfahren zur Herstellung eines Formteils für eine  
Turbinenschaufel, bei dem mehrere Werkzeugblöcke  
(1, 2, 3, 4) zur Bildung eines Hohlraums (5), der  
25 die Form der Turbinenschaufel vorgibt,  
formschlüssig zusammengesetzt werden, flüssiges  
Material, insbesondere Wachs, in den Hohlraum (5)  
eingebracht und in dem Hohlraum (5) ausgehärtet  
wird und die Werkzeugblöcke (1, 2, 3, 4)  
30 anschließend entfernt werden,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass zumindest ein Werkzeugblock (1, 2) eingesetzt  
wird, der einen dreh- oder verschiebbaren Einschub

- 17 -

oder Einsatz (7, 8) aufnimmt, der mit einer Fläche an den Hohlraum (5) angrenzt, wobei der Einschub oder Einsatz (7, 8) vor dem Einbringen des flüssigen Materials in einer Position und/oder Orientierung gegenüber dem zumindest einen Werkzeugblock (1, 2) fixiert wird, um mit der gewählten Position und/oder Orientierung die Form des Hohlraums (5) einzustellen.

10 10. Verfahren nach Anspruch 9  
dadurch gekennzeichnet,  
dass der Einschub oder Einsatz (7, 8) in der gewählten Position und/oder Orientierung über Befestigungsstifte gegenüber dem Werkzeugblock (1, 2) fixiert wird.

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass vor dem Einbringen des flüssigen Materials Zwischenstücke (14) in zwischen dem Einschub oder Einsatz (7, 8) und den Werkzeugblöcken (1, 2) und/oder zwischen mehreren Einschüben oder Einsätzen (7, 8) auftretende Zwischenräume eingeschoben werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11 zur Einstellung des Anstellwinkels des Schaufelblattes (11) der Turbinenschaufel (10) am Formteil.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11 zur Einstellung der Höhe der Schaufelplattform (12) der Turbinenschaufel (10) am Formteil.

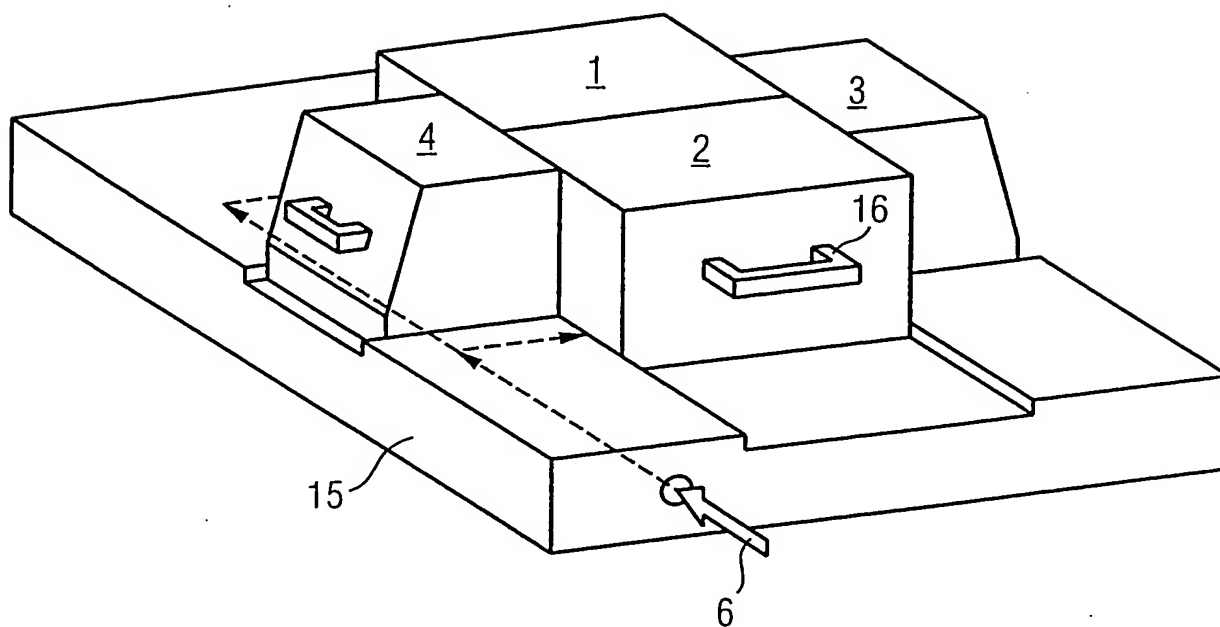
Zusammenfassung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Werkzeug zum Gießen eines Formteils für die Herstellung einer Turbinenschaufel (10) mit mehreren Werkzeugblöcken (1, 2, 3, 4), die in einer vorgegebenen Weise formschlüssig zusammengesetzt einen Hohlraum (5) für das Formteil bilden, in den über einen oder mehrere Zugangsöffnungen (6) fließfähiges Material einbringbar ist. Zumindest einer der Werkzeugblöcke (1, 2) nimmt einen dreh- oder verschiebbaren Einschub oder Einsatz (7, 8) auf, der mit einer Fläche an den Hohlraum (5) angrenzt und in unterschiedliche Positionen und/oder Orientierungen gegenüber dem Werkzeugblock (1, 2) fixierbar ist, so dass in den unterschiedlichen Positionen und/oder Orientierungen des Einschubs oder Einsatzes (7, 8) unterschiedliche Hohlraumgeometrien gebildet werden.

Das Werkzeug ermöglicht eine nachträgliche Änderung der Geometrie des Formteils, insbesondere des Anstellwinkels, ohne hierfür neue Werkzeugblöcke fertigen zu müssen. (Figur 3)

1/2

FIG 1



2/2

FIG 2

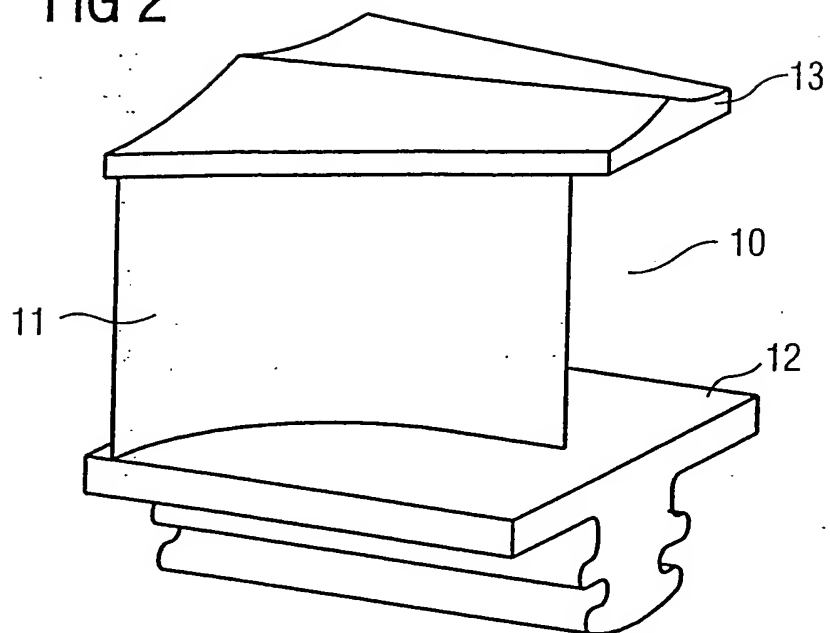
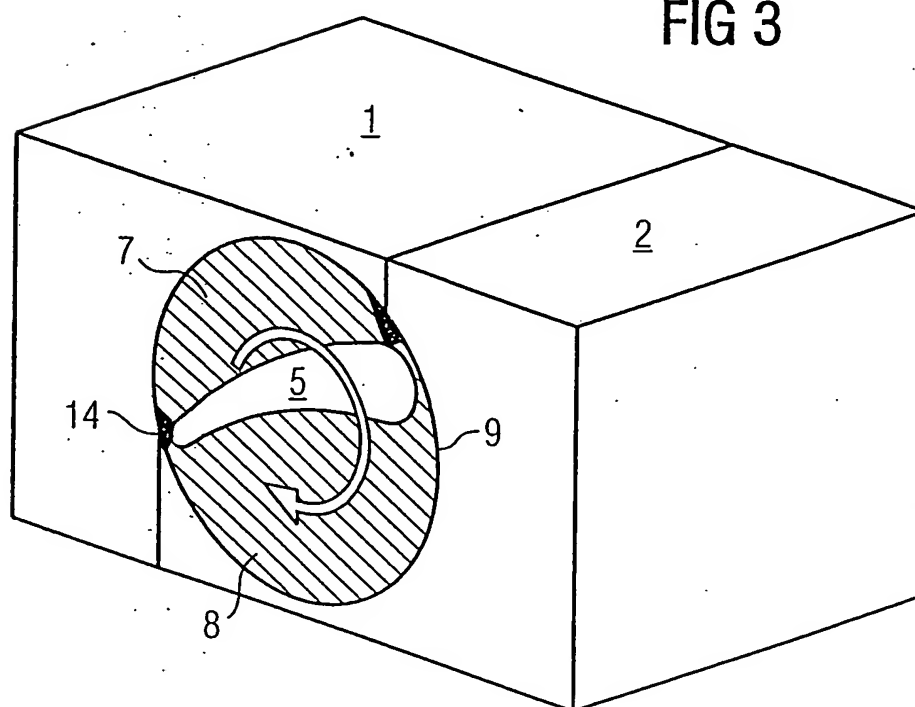


FIG 3



ALEXANDRIA  
TRANSLATIONS

8827 Fort Hunt Road ■ Alexandria, Virginia 22308 ■ Phone: 703/799-7606 ■ Fax: 703/799-7607



## CERTIFICATION

This is to certify that the attached English language document  
Tool and Process for Casting a Shaped Part for the Production of a Turbine  
Blade;  
is a true, accurate, and complete translation of the original German  
language document Werkzeug und Verfahren zum Gießen eines Formteils für die  
Herstellung einer Turbinenschaufel;  
to the best of our knowledge and belief.

Executed this 14th day  
of January, 2002

Richard C. Fisher

Richard C. Fisher  
Alexandria Translations LLC  
8827 Fort Hunt Road  
Alexandria, Virginia 22308  
ATA Corporate Member Number 213320

## **Tool and Process for Casting a Shaped Part for the Production of a Turbine Blade**

### Field of the Invention

The present invention relates to a tool for casting a shaped part for the production of a turbine blade, in which tool plural tool blocks, assembled with positive engagement in a predetermined manner, form for the shaped part a cavity into which a flowable material, particularly wax, can be introduced by means of one or more access apertures. The invention furthermore relates to a process for the production of a shaped part for a turbine blade with such a tool.

In the development of turbine blades, numerous tests and adjustments are to be performed in the different development stages, such as the development of casting, machining or manufacturing, and can affect the original tool development. Just differences between the aerodynamic model calculations and the later real properties of the finished system can make it necessary to prepare a new set of tools for the production of the initial shaped parts.

In the production and development process of a turbine blade, the shape of the turbine blade which is correct for the requirements is first calculated as a three-dimensional model. Injection molding tools are produced from this model, which make possible the casting of a shaped part with the calculated three-dimensional shape. These injection molding tools are as a rule assembled from several tool blocks, which, assembled with positive engagement in a predetermined manner, form a cavity for the shaped part. Molten wax is injected under high pressure through one or more access apertures into the cavity formed. The injected wax hardens after cooling to a shaped part, having the shape predetermined by the injection molding tools. The tool blocks are then removed. A ceramic casting mold for the later precision casting of the turbine blade is produced in a known manner with the shaped part prepared in this manner.

The production of the tool blocks for the injection mold is very expensive, since they are as a rule made of steel and are to define the shape of the later turbine blade as precisely as possible. Furthermore, the positive closure between the individual tool blocks must achieve a sufficient sealing effect against the wax injected under high pressure.

It is precisely the dimensioning and production of the first row of inlet guide blades of the turbine sets very high requirements, since the flow path of the hot gases is very sensitively affected by this first row. A minimum deviation of the attack angle of these guide blades from an ideal value already leads to a clear pressure increase or pressure decrease in the gas turbine, and this can considerably affect the efficiency. In the case of such an undesired deviation, a new shaped part with a correspondingly changed attack angle therefore has to be produced, and for this the production of a completely new injection molding tool is necessary. Furthermore, several additional tolerances are to be considered during the whole production process, and likewise can exert a substantial effect on the flow path of the hot gas. As examples, there may be mentioned in this connection, scatter in the processing of the casting, or deviations in coating thickness. Such deviations are not yet known in the initial dimensioning of the shaped part, and



can therefore likewise give rise afterwards to a change of the geometry of the injection molding tools.

Starting from this state of the art, the invention has as its object to provide a tool and also a process for the production of a shaped part for a turbine blade, making it possible to accomplish an easy change of the leading edge geometry or of the attack angle of the turbine blade without a complete new production of the injection molding tool.

### Summary of the Invention

The object is attained with the tool or the process of patent claims 1 or 9 respectively. Advantageous embodiments of the tool and of the process are the subject of the dependent claims.

The tool according to the invention for casting a shaped part for the production of a turbine blade is assembled from several tool blocks. These tool blocks, when assembled with positive engagement or pushed together in a predetermined manner, form a cavity for the shaped part, into which cavity a flowable material, such as, for example, molten wax, can be introduced through one or more access openings provided therefor. The present tool is distinguished in that at least one tool block receives a rotatable or displaceable insert or inset, which has one surface bordering on the cavity and which can be fixed in different positions and/or orientations with respect to the tool block, so that different cavity geometries or cavity volumes are formed in the different positions and/or orientations of the insert or inset.

The insert or inset here preferably consists of the same materials as the tool blocks and can be inserted into these with positive engagement. By means of the possibility of producing different cavity geometries in the different positions and/or orientations of the insert or inset, a later adaptation of the geometry of the shaped part can be undertaken by renewed introduction or injection of the liquid material into the cavity with a correspondingly changed position and/or orientation of the insert. A new production of the whole injection molding tool, i.e., the shaping inner surface of the respective tool blocks, is thereby no longer necessary. One or more inserts or insets can of course be provided in one or more tool blocks, and can be arranged by the person skilled in the art corresponding to the intended possibility of adjustment or displacement. The inserts are then fixed with a suitable fixing means in the desired position before filling with the flowable material, so that their position and/or orientation no longer changes during the filling and hardening process of the flowable material. The fixing of the one or more inserts preferably takes place by means of securing pins which engage in correspondingly provided recesses in the respective tool blocks. The securing pins are pushed in through corresponding apertures in the insert. The corresponding recesses in the tool blocks are constituted, according to the desired step spacing at which displacement is possible, as a correspondingly fine hole pattern.

The insert(s) is/are preferably embodied such that they determine the surfaces of the shaped part to be produced, which determine or contribute to the course of the hot gas path of the turbine blade. A particularly advantageous embodiment here relates to the arrangement of two inserts or insets in opposed tool blocks. The inserts or insets are here constituted such that when

assembled they form a cylindrical insert unit for the determination of the geometry of the blade. The insert unit assembled from the two inserts or insets is rotatable around its longitudinal axis in the tool blocks and can be fixed in different rotational positions. Different attack angles of the blade can be implemented by different rotational positions of the insert unit.

Fixing possibilities are preferably provided at such spacings that the attack angle can be changed in angular steps of  $0.25-0.5^\circ$ . In this manner, a shaped part with an altered attack angle can be produced very quickly, simply and without new construction of the tool blocks, if during further development it should transpire that the originally designed attack angle did not fulfill the requirements for the hot gas path because of manufacturing tolerances.

Such an embodiment of the tool has the further advantage that shaped parts can also be produced therewith for turbine blades of different plants without having to prepare a separate respective tool. For example, turbine blades for turbine plants with other flow properties or other mass flows, as particularly arise with gas turbines operated with different fuel types, can be produced hereby with one and the same tool.

For an adjustment of the parting lines in the tool on changing the position and/or orientation of the insert, adapters can be present, which displace the parting lines and/or compensate for a possible play between the insert and the tool block. It is also conceivable here to already provide corresponding, preferably wedge-shaped, interspaces between the inserts, into which the corresponding adapters can be inserted after the positioning of the inserts.

In a further possibility of embodiment of the present tool, an insert which is displaceable along an axis is provided in a tool block which substantially serves to define the shape of the blade platform and of the blade foot, the height of the blade platform being determined by the displacement position of the said insert. The displacement axis here corresponds to the z-direction, which on insertion of the later turbine blade corresponds to the radial direction.

In the production of the shaped part, the individual tool blocks are assembled, preferably pushed together, the insert(s) or inset(s) are brought into a position and/or orientation with which the desired geometry of the cavity or of the later shaped part is produced, and are fixed in this position on the tool blocks. Molten wax is then injected under high pressure into the thus produced cavity, and is solidified there by cooling. After solidification, the tool blocks with the associated inserts or insets are separated from the hardened wax shaped part. A separation of the inserts from the shaped part is facilitated by the adapters already described.

The tool and also the accompanying process for injection molding a shaped part for the production of a turbine blade is particularly suitable for the adjustment of the attack angle of the blade of the turbine blade or for the adjustment of the height of the blade platform of the turbine blade. The tool offers particular advantages in cases in which a high number of adjustments have to be undertaken during the development of the turbine blade. The more adjustments are required, the more advantages the present process offers, since a new injection molding tool does not have to be produced for each adjustment. The adjustments can instead be implemented by simple adjustment of the insert within the tool.

The tool or the accompanying process principally relate to the production of shaped parts

made of wax. It is, however, obvious to the person skilled in the art that other meltable materials other than wax can be used for the production of the shaped parts with the present tool. Furthermore, the material of the tool blocks play no essential part for the invention, so that materials are available to the person skilled in the art for this, as required corresponding to the respective application. The external embodiment of the individual tool blocks can likewise be undertaken here according to the known state of the art.

### Brief Description of the Drawings

The invention is again briefly described hereinbelow using an embodiment example in connection with the accompanying drawings, without limitation of the general concept of the invention.

- Fig. 1 is a diagram showing an example of an injection molding tool which is assembled from several tool blocks;  
Fig. 2 is a diagram schematically showing the construction of a turbine blade; and  
Fig. 3 is a diagram showing an example of the embodiment of an inset in a tool according to the present invention.

### Description of Preferred Embodiments

Fig. 1 shows an example of an injection molding tool for the production of shaped parts for turbine blades. The tool consists of a baseplate 15 on which the four tool blocks 1-4 are arranged. The baseplate and the tool blocks consist of a steel material. The tool blocks can be displaced in corresponding guides of the baseplate 15, as can be seen from the Figure. The inner surfaces of these tool blocks 1-4 are shaped such that after assembly they form a cavity which provides the shape for the shaped part to be manufactured.

The individual tool blocks are in this example pushed together in the respective guides so that with positive engagement they seal off the cavity from the exterior. A wax injection aperture 6 is in this example provided in the baseplate 15, and the injected liquid wax reaches the cavity 5 by means of corresponding channels (shown dashed). The wax is injected under high pressure here and is solidified by cooling in the cavity. The tool blocks 1-4 are then separated from the wax shaped part produced in this manner. This separation takes place by pulling apart the individual tool blocks in the guides. Corresponding handles 16 are provided on the tool blocks for this purpose in the present example. An arrangement of this kind is already known from the prior art, but can also be used for the tool of the present invention, at least one bounding surface of the cavity 5 formed by the tool blocks 1-4 then being formed by a surface of an insert or inset, not visible in this illustration.

With such a tool, shaped parts for turbine blades are manufactured, such as are seen in Fig. 2, for example. This Fig. 2 shows the typical components of a turbine blade 10: the blade 11, a blade band 13, as well as a platform 12. For the production of a shaped part constructed in this manner, the inner surfaces of the tool blocks 1 and 2 of Fig. 1 are embodied for determining

the suction and pressure side of the blade 11, the tool block 3 is embodied for determining the shape of the blade platform 12, and the tool block 4 is embodied for determining the shape of the blade 13.

With a fixed present geometry of the inner surfaces of these tool blocks 1-4, no possibility exists of a subsequent adjustment of the geometry, for example for the production of another attack angle of the blade. Such a possibility of adjustment is implemented with the tool according to the invention, which is shown in a possible variant embodiment in Fig. 3. Fig. 3 here shows only a portion of the tool with the tool blocks 1 and 2 for determining the blade 11. The further tool blocks 3 and 4 corresponding to Fig. 1 are embodied as known from the state of the art.

In contrast to the known tools of the prior art for the production of shaped parts for turbine blades, the present tool has in this example two tool blocks 1 and 2, which respectively receive an insert 7 or 8 with positive engagement. For this purpose, the inner surfaces of both the tool blocks 1 and 2 are correspondingly shaped. On assembly of the two tool blocks with their inserts or insets 7 and 8, a cylindrical insertion unit 9 is formed which is rotatable about its longitudinal axis within the tool blocks 1, 2, as is indicated in Fig. 3 by the arrow. The two inserts 7 and 8 here cooperatively form the geometrical shape for the blade 11, i.e., their surfaces bounding the cavity 5 are shaped corresponding to the pressure and suction side of the blade.

Optional attack angles of the blade 11 with respect to the platform 12 or to the blade band 13 can be produced by means of the rotatability of the insertion unit 9. The insertion unit 9 is fixed in the corresponding desired position with respect to the tool blocks 1 and 2 by means of securing pins (not shown in the Figure). The tool blocks 1 and 2 have a corresponding hole pattern for different settings for this purpose.

In this embodiment example, furthermore, a substantially wedge-shaped cavity is provided between the two inserts 7, 8 at the transition to the tool blocks 1, 2; interchangeable adapters 16 can be inserted into the said wedge-shaped cavity. These adapters 14 facilitate the dismantling of the individual tool blocks after the injected material has hardened.

The tool is embodied in a preferred embodiment such that the attack angle, i.e., the insert unit 9, can be rotated in steps of about  $0.25-0.5^\circ$  through a maximum angle of  $2-3^\circ$ , and can be fixed. This is sufficient for the development of a turbine blade, taking possible later adjustment changes into consideration.

In the same manner, a corresponding insert can be provided in the tool block 3, this time displaceably embodied in the direction of the blocks 1 and 2, in order to be able to adjust the height of the platform 12 of the shaped part. It goes without saying that other surfaces of the shaped part can also be changed or adjusted in this manner, if a corresponding movable insert is provided.

#### List of Reference Numerals

- 1      tool block for pressure side

- 2 tool block for suction side
- 3 tool block for the blade platform
- 4 tool block for the blade band
- 5 cavity
- 6 access apertures
- 7 insert or inset
- 8 insert or inset
- 9 assembled insert unit
- 10 turbine blade
- 11 blade
- 12 blade platform
- 13 blade band
- 14 adapter
- 15 baseplate
- 16 handle

### Claims

1. Tool for casting a shaped part for the production of a turbine blade, with several tool blocks (1, 2, 3, 4) which, when assembled with positive engagement in a predetermined manner, form a cavity (5) for the shaped part, into which cavity flowable material can be introduced by means of one or more access apertures (6), wherein at least one of the tool blocks (1, 2) receives a rotatable or displaceable insert or inset (7, 8) which borders on the cavity (5) with a surface and which can be fixed in different positions and/or orientations with respect to the at least one tool block (1, 2), so that different cavity geometries are formed in the different positions and/or orientations of the insert or of the inset (7, 8).
2. Tool according to claim 1, wherein the insert or inset (7, 8) determines or contributes to the hot gas geometry of the blade (11) of the turbine blade (10).
3. Tool according to claim 1 or 2, wherein at least two inserts or insets (7, 8) are constituted in opposed tool blocks (1, 2), such that when assembled they form, for determining the geometry of the blade (11), a cylindrical insertion unit (9) which is rotatable around its longitudinal axis in the tool blocks (1, 2) for setting the attack angle of the blade (11) and which can be fixed in different rotation positions.
4. Tool according to one of claims 1-3, wherein the rotatable insert or inset (7, 8) can be fixed in rotation positions which respectively differ by about 0.25-0.5°.
5. Tool according to one of claims 1-4, wherein the, or a further, insert or inset is arranged to be displaceable along an axis in a tool block (3) which determines the geometry of the blade platform (12), such that in different displacement positions, different heights of the blade platform (12) are produced.
6. Tool according to one of claims 1-5, wherein adapters (14) are provided which are insertable into interspaces arising between the insert or inset (7, 8) and the tool blocks (1, 2) and/or between several inserts or insets (7, 8).
7. Tool according to one of claims 1-6, wherein at least one insert or inset (7, 8) can be fixed in the different positions and/or orientations with respect to the tool block (1, 2) by means of securing pins which engage in corresponding

recesses in the tool block (1, 2).

8. Tool according to one of claims 1-7,  
wherein

the tool blocks (1, 2, 3, 4) include, arranged on a baseplate (15), a tool block (1) for the pressure side of the blade (11), a tool block (2) for the suction side of the blade (11), a tool block (3) for the blade platform (12), and a tool block (4) for the blade band (13) of the turbine blade (10).

9. Process for the production of a shaped part for a turbine blade, in which several tool blocks (1, 2, 3, 4) are assembled with positive engagement for the formation of a cavity (5) which gives the shape of the turbine blade, liquid material, particularly wax, is introduced into the cavity (5) and hardened in the cavity (5), and the tool blocks (1, 2, 3, 4) are then removed,  
wherein

at least one tool block (1, 2) is used, which receives, before the introduction of the liquid material, a rotatable or displaceable insert or inset (7, 8) which borders on the cavity (5) with a surface, the insert or inset (7, 8) being fixed, before the introduction of the flowable material, in a position and/or orientation with respect to the at least one tool block (1, 2) in order to set the shape of the cavity (5) with the selected position and/or orientation.

10. Process according to claim 9,  
wherein

the insert or inset (7, 8) is fixed in the selected position and/or orientation with respect to the tool block (1, 2) by means of securing pins.

11. Process according to claim 9 or 10,  
wherein,

before the introduction of the flowable material, adapters (14) are inserted into interspaces arising between the insert or inset (7, 8) and the tool blocks (1, 2) and/or between several inserts or insets (7, 8).

12. Process according to one of claims 9-11 for the adjustment of the attack angle of the blade (11) of the turbine blade (10) on the shaped part.

13. Process according to one of claims 9-11 for the adjustment of the height of the blade platform (12) of the turbine blade (10) on the shaped part.

### Abstract

The present invention relates to a tool for casting a shaped part for the production of a turbine blade (10), with several tool blocks (1, 2, 3, 4) which, when assembled with positive engagement in a predetermined manner, form a cavity (5) for the shaped part, into which cavity flowable material can be introduced by means of one or more access apertures (6). At least one of the tool blocks (1, 2) receives a rotatable or displaceable insert or inset (7, 8) which borders the cavity (5) with a surface and which can be fixed in different positions and/or orientations of the tool blocks (1, 2), so that different cavity geometries are formed in the different positions and/or orientations of the insert or inset (7, 8).

The tool makes possible a later change of the geometry of the shaped part, in particular of the attack angle, without having to manufacture new tool blocks for this purpose. (Fig. 3)